



Abschlussbericht

Neue Technologieansätze für
automatisierbare Terminals
im kombinierten Verkehr (TaT)

Teilvorhaben: Hochpräzise, verlässliche
Ortung von Kranen und mobilen Einheiten

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 19 G 701 1 C



DLR

Abschlussbericht

Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr (TaT)

Teilvorhaben: Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und mobilen Einheiten

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FÖRDERKENNZEICHEN: 19 G 701 1 C

Autoren:

Dr. Roland Reimer

Thoralf Noack

Benedikt Scheier

Dr. Michael Meyer zu Hörste

DLR, Institut für Kommunikation und Navigation

DLR, Institut für Kommunikation und Navigation

DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik

DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik

Datum der Berichterstellung: 26.10.2011

Copyright nach DIN 34 beachten.

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhaltes sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	3
1.1	Das Projekt TaT	3
1.2	Hochpräzise verlässliche Ortung von Kranen	3
1.3	Struktur des Abschlussberichtes	4
2	Anforderungen	5
2.1	Geforderte Genauigkeit	5
2.2	Ortungssystem	5
2.3	Einsatzpotential	5
2.4	Einbindung in das Gesamtsystem	5
3	Festlegungen	7
3.1	Koordinatensystem	7
3.2	Zeitbasis	8
3.3	Positionsrelevante Werte des bestehenden Kranwegmesssystems	8
3.4	Positionsupdate	8
3.5	Datenbereitstellung der SPS für das PBM	8
3.6	Datenbereitstellung des PBM zurück an die SPS	8
4	Ergebnisse	9
4.1	Standortwahl und Aufbau von Hardware-Systemkomponenten des Ortungssystems	9
4.2	Entwicklung des Positionsbestimmungsmoduls	13
4.2.1	Algorithmus	14
4.2.2	SW-Umsetzung des PBM	18
4.3	Messergebnisse	20
4.3.1	Messungen unter Langzeitbedingungen	21
4.3.2	Messungen zur Krandynamik	21
4.3.3	Bestimmung des Messfehlers	22
4.3.4	Vergleich der Messergebnisse mit vorhandenem Kranwegmesssystem	23
5	Verwertung	26
5.1	Unmittelbare Weiterverwendung der Projektergebnisse	26
5.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	26
5.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	26
5.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	27
5.5	Veröffentlichung / Demonstration der Ergebnisse	27
6	Zusammenfassung	28
7	Anhang	29
7.1	Referenzen	29
7.2	Abkürzungsverzeichnis	29
7.3	Abbildungsverzeichnis	31
7.4	Tabellenverzeichnis	31

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Das Projekt TaT

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Verbundprojekt „Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr“ (TaT)¹ wurde unter dem Anspruch durchgeführt, mittelfristig eine Verbesserung der Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten in Umschlagbahnhöfen des kombinierten Verkehrs zu erreichen. Ziel war es, zunächst die technischen Grundlagen für den (teil-) automatisierten operativen Terminalbetrieb zu entwickeln und zu erproben, um darauf aufbauend neue Verfahren für die Optimierung der Kransteuerung im Rahmen automatisierter Prozesse implementieren zu können.

Partner in diesem Projekt unter Führung des Geschäftsbereiches DB Netz AG der Deutschen Bahn AG waren

- die Deutsche Umschlagsgesellschaft Schiene - Straße (DUSS) mbH,
 - das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Institut für Verkehrssystemtechnik und Institut für Kommunikation und Navigation)
- und als Unterauftragnehmer
- die Berghof Automatisierungstechnik GmbH,
 - die Polo KnowHow GmbH,
 - und Nießen, Stöhr, Zahm Partnerschaft – Ingenieure.

Als Test- und Entwicklungsumgebung wurde während der kompletten Projektlaufzeit der Umschlagbahnhof der DUSS in Kornwestheim genutzt.

Das Projekt wurde am 01. November 2007 begonnen und endete – nach einer halbjährigen aufwandsneutralen Laufzeitverlängerung – am 30.04.2011.

1.2 Hochpräzise verlässliche Ortung von Kranen

Eine wichtige Aufgabe, um von der bestehenden, starren Struktur der Ablage und Stapelung von Ladeeinheiten (LE) in 25 m Boxen weg zu kommen und somit zur flexiblen Ablage der LE zu gelangen, bestand darin, den Kranfahrweg jederzeit hochgenau und verlässlich bestimmen zu können. Mit dieser Aufgabe befasste sich das Teilvorhaben 3 „Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen“, welches im Projekt unter dem Arbeitstitel „Konzeption und Entwicklung der Satellitennavigation“ bearbeitet wurde und dessen Ergebnisse im Rahmen dieses Berichtes beschrieben werden.

Krananlagen, die auf großen Umschlagterminals betrieben werden, verfügen in der Regel über Messeinrichtungen zur Messung des Fahrweges, der Katzbewegung sowie des Seilhubes. Während sich die Katzfahrt und der Seilhub hinreichend genau messen lassen, weisen Einrichtungen zur Messung der zurückgelegten Wegstrecke auf der Basis von Radimpulszählern das Manko auf, dass bedingt durch den Schlupf der Räder ein Driftverhalten eintritt. Dieses lässt bei nur zeitweiser Kalibrierung (z.B. am Anfangspunkt der Kranbahn) den Messfehler im laufenden Betrieb auf mehrere Meter anwachsen. Mittlerweile sind neue Systeme in der Erprobung, die die stetige Kalibrierung an mehreren Stützstellen entlang des Fahrweges ermöglichen, so dass das Driftverhalten und der verbundene Messfehler stark minimiert werden können; dennoch kann auch bei solchen Systemen zwischen den Stützstellen der Messfehler anwachsen. Ein Lösungsansatz, diesem Driftverhalten entgegen zu wirken besteht darin, die

¹ Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter den Förderkennzeichen: 19 G 701 1 A, 19 G 701 1 B und 19 G 701 1 C

Krananlagen mit hochgenauer GNSS-Messtechnik auszurüsten und basierend auf differentiellen Trägerphasenmessungen Absolutgenauigkeiten besser als 10 cm zu erzielen. Die Verlässlichkeit der Ortungslösung lässt sich prinzipiell nur durch redundant ausgelegtes Messequipment, durch den Einsatz von alternativ agierenden Backup-Messsystemen oder die Überwachung des Nahbereiches von Umschlagterminals durch Ground Based Augmentation Systeme (GBAS) erreichen. Dies sollte im Projekt aber schon aufgrund der dazu erforderlichen hohen Zusatzkosten nicht erfolgen, so dass der Zuverlässigkeit der allein auf Basis von GNSS bestimmten Positionslösung im Lösungsalgorithmus selbst Beachtung geschenkt werden muss.

1.3 Struktur des Abschlussberichtes

Der Ergebnisbericht folgt folgender Struktur: Ausgehend von den formulierten Anforderungen an das Ortungssystem und den daraus resultierenden Festlegungen (Kapitel 2 und 3) werden in Kapitel 4 die Ergebnisse der Arbeit (Umsetzung des Systems, Algorithmus, erstellte Software (SW) sowie Messergebnisse) erläutert. In Kapitel 5 wird auf die Möglichkeiten zur Verwertung der Teilprojektergebnisse aus wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Sicht eingegangen.

2 Anforderungen

2.1 Geforderte Genauigkeit

Bislang sind die Stellplätze für die Ladeeinheiten auf den Umschlagterminals der DUSS in Boxen von 25 m Länge eingeteilt. Da nicht alle Ladeeinheiten die gleiche Länge aufweisen, sollen zukünftig dynamische Unterteilungen entlang des Fahrweges möglich werden, für die dann aber eine eindeutige Adressierung der Abstellorte erforderlich wird.

Da aus der Kransteuerung selbst bereits die zwei Richtungsgrößen Querrichtung als Beschreibung der Katzfahrt und Höhe als Beschreibung des Kranhubs (Seillänge) durch interne Positionsgeber hinreichend genau bekannt sind, sollte ein externes Ortungssystem zur Verbesserung der Genauigkeit des zurückgelegten Fahrweges auf dem Gleis dienen. Ausgegeben werden sollte der zurückgelegte Fahrweg in Millimeter bezogen auf einen Startpunkt bei 0 mm, der sich an einem Ende der Kranbahn befindet. Die Genauigkeitsanforderung an die Ortung der Portalkrane bezogen auf den maximal tolerierbaren Fehler auf dem zurückgelegten Fahrweg wurde durch die Verbundleitung und den Terminalbetreiber auf ≤ 10 cm festgelegt.

2.2 Ortungssystem

Als Ortungssystem sollte ein auf GNSS basierendes Positionierungssystem zum Einsatz gelangen, welches, ergänzt durch eine terrestrische Referenzstation auf dem Gelände des Containerterminals, die cm-genauen Ortungsanforderungen erfüllen kann.

2.3 Einsatzpotential

Das Ortungssystem sollte auf Krananlagen im Umschlag von Ladeeinheiten einsetzbar sein. Die ursprünglich erwogene Absicht, das Ortungssystem auch auf mobile (Umschlag-) Einheiten zu erweitern, wurde in Absprache mit der Verbundleitung und dem Projektträger nicht weiter verfolgt, da der Einsatz mobiler Einheiten in großen Umschlagbahnhöfen zukünftig aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten keine Rolle mehr spielen wird.

2.4 Einbindung in das Gesamtsystem

Die SW-Komponente des externen Ortungssystems (im Weiteren stets als PBM – Positionsbestimmungsmodul – bezeichnet) sollte über eine geeignete Schnittstelle verfügen, um mit der Kransteuerung auf Basis einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (Kran-SPS) kommunizieren zu können (siehe Abbildung 2-1). Dabei sollte getestet werden, ob die Kommunikation - wie bei anderen Krankomponenten üblich - über Object Linking and Embedding for Process Control (OPC) erfolgen kann oder ein eigener Kommunikationsserver zu entwickeln wäre.

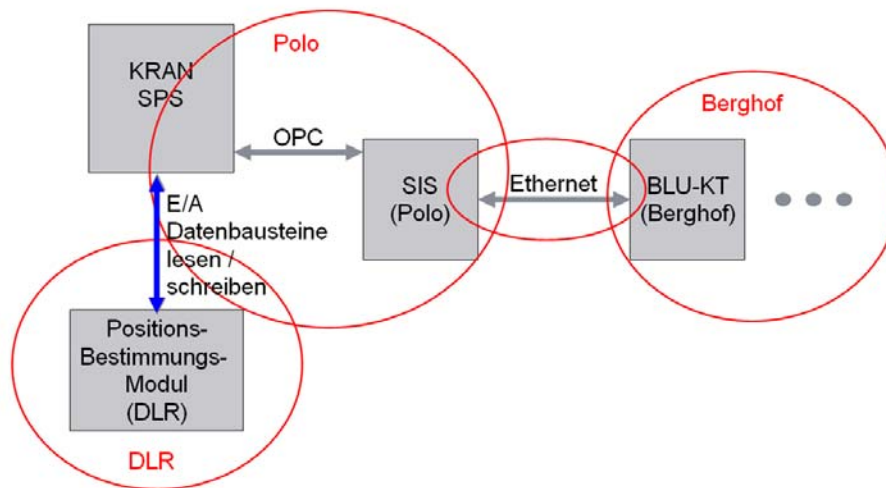


Abbildung 2-1: Interfaces zwischen verschiedenen Elementen der Kransteuerung unter Einbeziehung des Positionsbestimmungsmoduls

3 Festlegungen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Anforderungen an das Positionsbestimmungsmodul (PBM) und dessen Einbindung in die vorhandene Krantechnik im Containerterminal Kornwestheim identifiziert und dargestellt.

Zusätzlich zu den technischen Anforderungen an das PBM sind Festlegungen von Parametern zu treffen und entsprechend zu begründen. Hierbei handelt es sich um Parameter, die den Betrieb des PBM und insbesondere hierbei die Positionsermittlung direkt beeinflussen, wie das zugrunde gelegte Koordinatensystem für die Ortungslösung, Definition einer system-einheitlichen Zeitbasis, die Häufigkeit einer Positionsbestimmung und die Einbindung von auf dem Kran vorhandenen Positionswerten.

Ferner wird der Datenaustausch zwischen PBM und der SPS des Krans spezifiziert, um hierüber eine Kommunikation zu ermöglichen.

3.1 Koordinatensystem

Für die Nutzung eines Ortungssystems ist es erforderlich ein Koordinatensystem zu definieren, in dem sich die ermittelten Lagedaten abbilden lassen. Da es sich bei der Nutzung für die Positionsbestimmung um die Abbildung im Raum – in diesem speziellen Fall auf der Erde – handelt, wurde ein kartesisches Koordinatensystem gewählt.

Gemäß der Anwendung im dreidimensionalen Raum wurde das Koordinatensystem ebenfalls dreidimensional ausgelegt – siehe Abbildung 3-1.

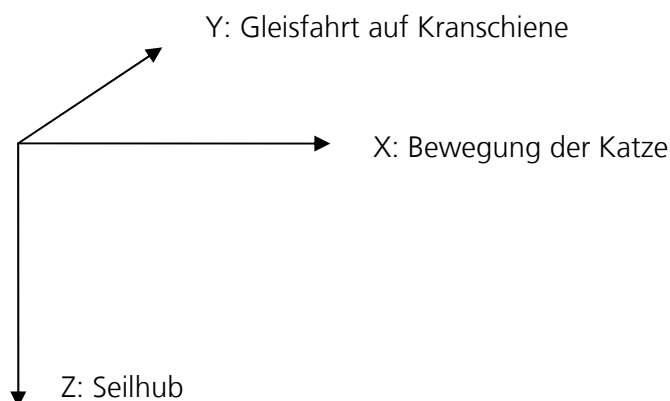


Abbildung 3-1: Verwendetes Koordinatensystem zur Beschreibung der Position eines Containers während der Kranfahrt

Da es sich in dem vorliegenden Falle um eine spezielle Anwendung des Koordinatensystems ausschließlich für die Positionierung einer Ladeeinheit in Anhängigkeit zum Containerkran handelt, wurde auch das Koordinatensystem entsprechend gedreht. Die Y-Koordinate gibt die Längsbewegung des Kranes entlang der Kranbahn an. Die X-Koordinate beschreibt die Querbewegung des Kranes durch einen Kranausleger (Katze), während die Z-Koordinate die Länge des Kranseils angibt.

Der Ursprung des Koordinatensystems wird dabei auf die Ruheposition der Katze (X-Achse), der Null-Position der Kranbahn (Y-Achse) und der oberen Endlage des Hubwerkes (Z-Achse) definiert.

3.2 Zeitbasis

Jedes rechnerbasierte System verfügt über eine eigene Zeitbasis. Insbesondere bei der Verwendung von mehreren Systemen ist es zwingend erforderlich, eine gemeinsame Zeitbasis zu definieren.

Bedingt durch den Einsatz eines GNSS Systems mit hochgenauer Zeitbasis sowie den Einsatz normaler Quarze seitens der SPS muss davon ausgegangen werden, dass zwischen den Zeitmarken der Positionsangaben des PBM und denen der SPS ein Offset vorhanden ist und zudem die Differenz zwischen beiden Systemen einem Driftverhalten ausgesetzt ist.

Diese Umstände müssen in der Erstellung der Algorithmik und bei der Bewertung der Ergebnisse zwingend beachtet werden.

3.3 Positionsrelevante Werte des bestehenden Kranwegmesssystems

Die Kransteuerung liefert über die SPS Positionsangaben in X, Y und Z Richtung als mm-Werte. Bzgl. der Position einer Ladeinheit können im Fall starken Windes oder beim schnellen Abstellen Abweichungen zur Positionsbestimmung der Katze in X- und Y-Richtungen auftreten. Diese Abweichungen sind nach Abstimmung mit den Projektpartnern als vernachlässigbar einzustufen. Geschwindigkeiten aus der Kransteuerung werden nicht genutzt, da aufgrund der permanenten Beschleunigungs- und Bremsvorgänge keine belastbaren Geschwindigkeitsangaben ableitbar sind.

3.4 Positionsupdate

Im Sinne der Fahrbewegungen des Kranes wurde eine Updaterate der Positionsinformation (zurückgelegter Fahrweg) von 10 Hz (100 ms) festgelegt.

3.5 Datenbereitstellung der SPS für das PBM

Tabelle 3-1: Beschreibung der Inputdaten der SPS an das PBM

Parameter	Format	Genauigkeit	Dimension
Position der Katze (X-Wert)	Unsigned Integer	Hinreichend genau	mm
Zurückgelegter Kranweg (Y-Wert)	Unsigned Integer	sehr ungenau, bis mehrere m Fehler	mm
Länge des Hubwerkes über Grund (Z-Wert)	Unsigned Integer	hinreichend genau	mm
Initialisierungsposition X (Katze)	Unsigned Integer	mm-genau	mm
Initialisierungsposition Y (Kranfahrt)	Unsigned Integer	mm-genau	mm
Initialisierungsposition Z (Hubwerk)	Unsigned Integer	mm-genau	mm
Exportbit (Aufnehmen der LE)	BOOL	0/1	n.a.
Importbit (Absetzen der LE)	BOOL	0/1	n.a.

3.6 Datenbereitstellung des PBM zurück an die SPS

Tabelle 3-2: Beschreibung der Outputdaten des PBM an die SPS

Parameter	Format	Genauigkeit	Dimension
Zurückgelegter Kranweg (Y-Wert)	Unsigned Integer	auf 10 cm genau	mm

4 Ergebnisse

4.1 Standortwahl und Aufbau von Hardware-Systemkomponenten des Ortungssystems

Das neue Ortungssystem wurde auf einer Krananlage am DUSS Standort

Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene – Straße (DUSS) mbH
Am Containerbahnhof 1
70806 Kornwestheim

installiert. Alle während der Entwicklung erforderlichen Analysen und Tests wurden zunächst auf Kranbahn 1 (Kran1) durchgeführt. Mit der Umrüstung des Kranes 3 auf die SPS7 um den Jahreswechsel 2010/2011 wurde für die Demonstration und weiterführende Nutzung das neue Ortungssystem letztlich auf Kranbahn 2 (Kran 3) verlegt.

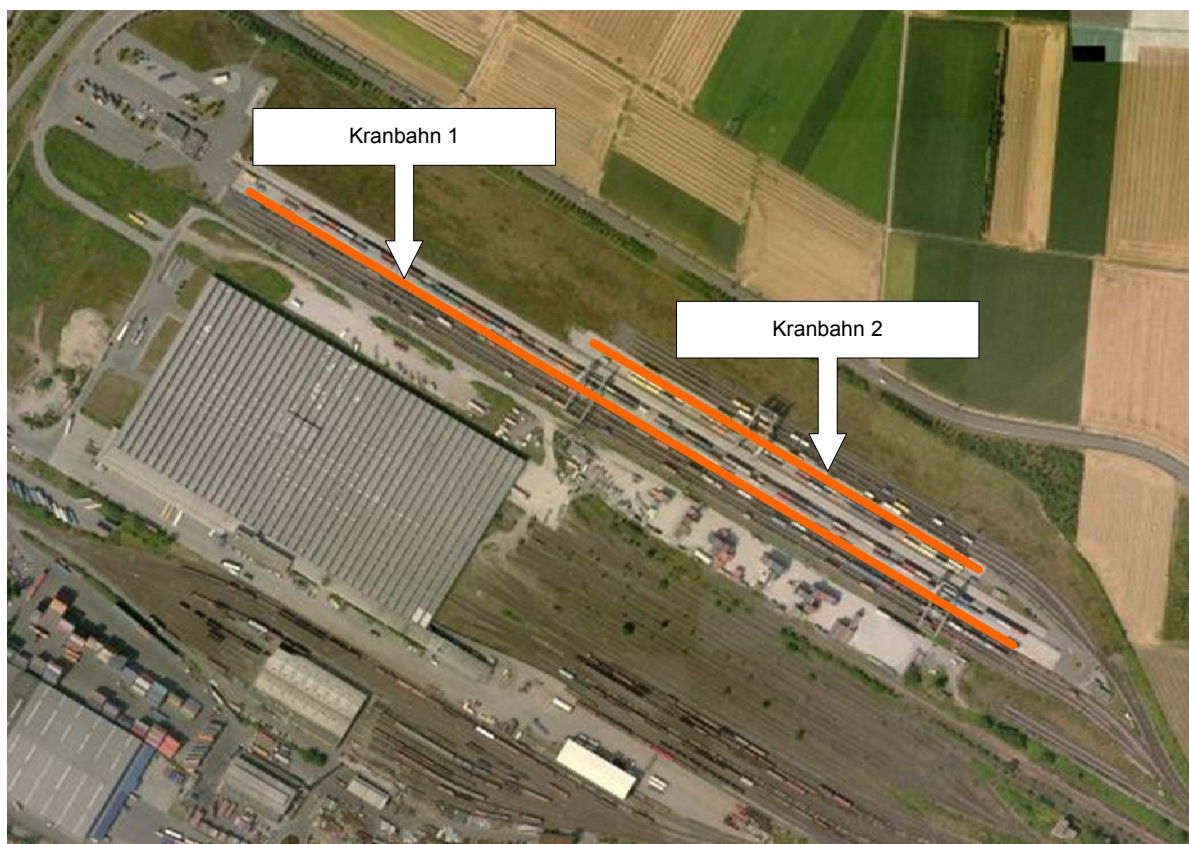


Abbildung 4-1: Lage der Kranbahnen im Containerterminal Kornwestheim,
Quelle: Bing Maps + eigene Beschriftung

Das komplette Ortungssystem setzt sich aus den beiden Hauptkomponenten

- Referenzstation
- Ortungssystem auf Kran (Rover)

zusammen (siehe Abbildung 4-2).

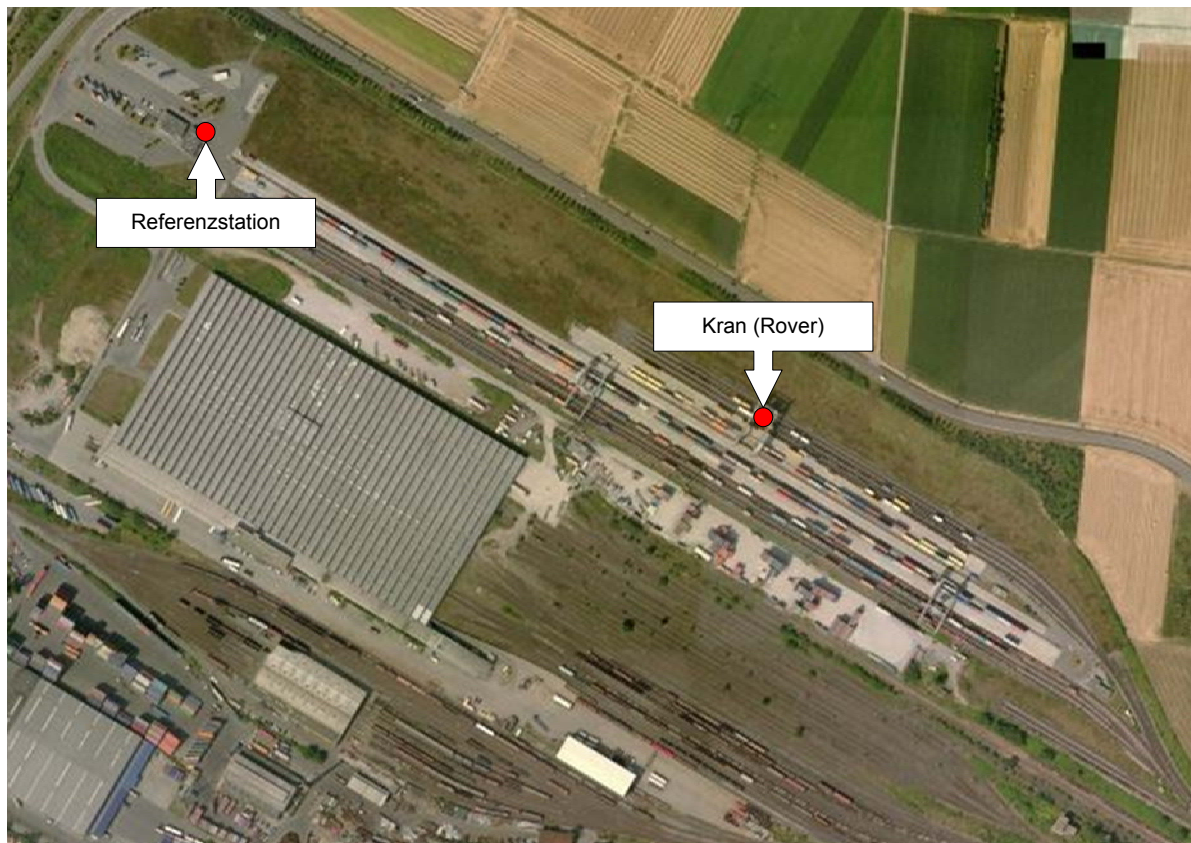


Abbildung 4-2: Darstellung der Lage der beiden Hauptkomponenten des Ortungssystems; feste Referenzstation im Eingangsbereich des Terminals und bewegliches Ortungssystem auf Kranbahn 2 (Kran 3,) Quelle: Bing Maps + eigene Beschriftung

Es handelt sich dabei um ein System, welches weitläufig unter dem Namen D-GNSS (differentielles System für Globale Satellitensysteme) bekannt ist. Um eine hochgenaue Positionierung zu ermöglichen ist D-GNSS auf Basis der Nutzung der Trägerphasensignale anzuwenden, wobei dann von RTK (Real Time Kinematik) gesprochen wird. Das Verfahren eines differentiell arbeitenden phasenbasierten Ortungssystems lässt sich kurz wie folgt beschreiben:

- Eine differenzielle GNSS-Messstation besteht aus zwei Komponenten, der (Boden-) Referenzstation (Base) und dem Rover (Kran).
- Die Referenzstation empfängt GNSS-Daten und sendet die eigenen Rohdaten über einen Funkkanal an den Rover.
- Der Rover empfängt eigene GNSS-Daten und zusätzlich die Rohdaten der Referenzstation. Aufgrund der bekannten hochgenauen Position der Referenzstation und daraus ableitbarer Kenntnisse über das prädizierte Fehlerbudget ist der Rover über differentielle Verfahren in der Lage, die Mehrdeutigkeit der Trägerphasenlage zu fixen.
- Damit steht am Standort des Rovers für jeden Messzeitpunkt eine hochgenaue Positionsangabe (zunächst in WGS84-Koordinaten) zur Verfügung.

Die technische Umsetzung dieses Prinzips ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

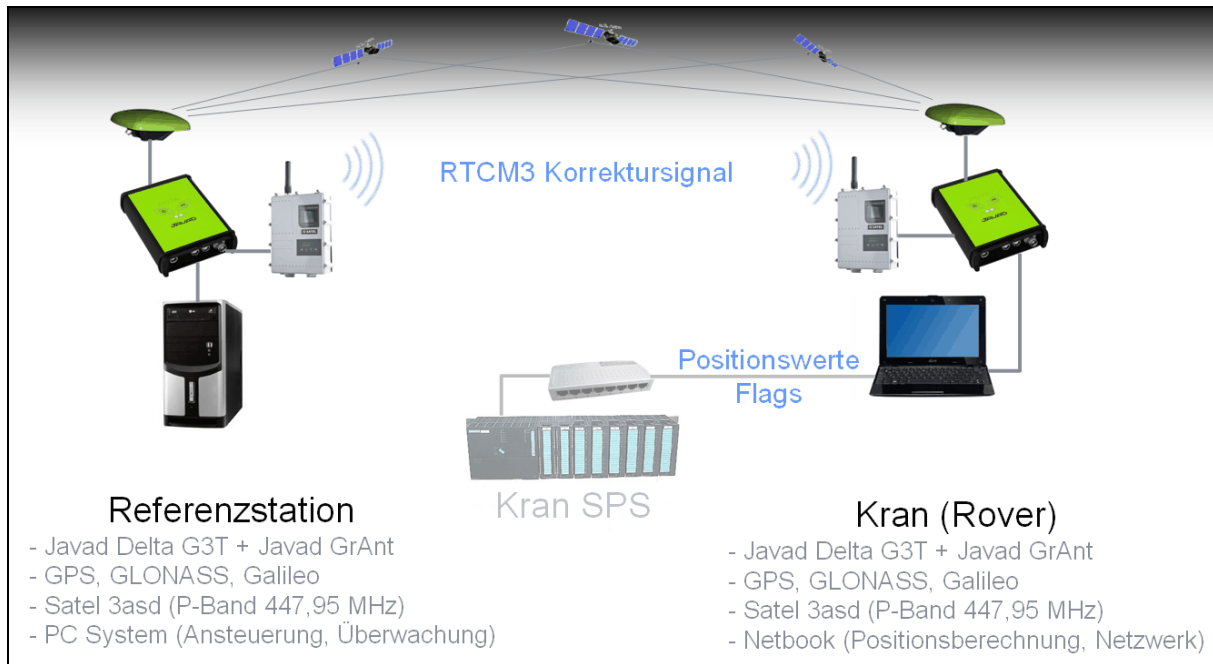


Abbildung 4-3: Schematische Zeichnung des Aufbaus und der Komponenten des D-GNSS basierten Ortungssystems am DUSS Standort Kornwestheim

Für das System in Kornwestheim wurden geodätische GNSS Empfänger vom Typ Javad Delta G3T eingesetzt. Die Empfänger erlauben die Akquisition von mehreren GNSS Trägerfrequenzen (GPS L1/L2/L2C/L5 sowie GLONASS L1/L2) und sind zudem bereits für den Empfang von Galileo E1/E5a (im Aufbau befindliches europäisches Satellitennavigationssystem) vorbereitet. Die Empfänger sind jeweils mit einer Multi-GNSS-Mikrostripantenne verbunden, die den eigentlichen Signalempfang der GNSS-Signale ermöglicht. Die Datenübertragung von der Referenzstation zum Kran erfolgt über Modems der Firma Satel 3asd, die eine Sendeleistung bis max. 10 W ermöglichen. Für die Übertragung von Korrektursignalen auf 447,95 MHz mit einer Kanalbandbreite von 12,5 kHz wurde durch die Bundesnetzagentur mit Wirkung vom 20.10.2009 unter der Zuteilnummer 72 09 1637 die Genehmigung erteilt, bis zum 19.10.2019 mit einer Strahlungsleistung (ERP) von max. 5 Watt die Korrektursignale permanent abstrahlen zu dürfen. Die effektiv genutzte Strahlungsleistung beträgt 1 W, da der Abstand zwischen Referenzstation und Kran 800 m nicht überschreitet. Das Übertragungsformat für die Korrekturdaten ist CMR (Compact Measurement Record).

Der in Abbildung 4-3 dargestellte Aufbau ermöglicht es, sukzessive den gesamten Fuhrpark der Krane mit der Rovertechnologie (Empfänger, Antenne und Funkmodem) auszustatten. Insofern mittelfristig die Kräne auch über LAN verfügen, wird es möglich sein, die Korrektursignale der Referenzstation über ntrip-Technologien zu verteilen und damit auf die Funkmodems zu verzichten. Die GNSS-Empfänger wären dazu mit der ntrip-Option nachzurüsten.

Abschließend zum Hardwareaufbau vermitteln die nachfolgenden Bilder einen Überblick über die installierte Ortungstechnik im Bereich der Referenzstation (siehe Abbildung 4-4) und auf dem Kran (siehe Abbildung 4-5).



Abbildung 4-4: Installierte Komponenten am Standort der Referenzstation; oben links: Eingangsgebäude der DUS mit Antenne an rechter Vorderseite; oben rechts: GNSS-Empfänger und Funkmodem, unten links: GNSS Antenne und 70 cm Funkantenne zur Abstrahlung des Korrektursignals; unten rechts: gesamtes Equipment der Referenzstation mit PC, GNSS-Empfänger, Funkmodem und Monitor.



Abbildung 4-5: Installierte Komponenten auf dem Kran; oben links: Krananlage; oben rechts: GNSS-Antenne, unten links: 70 cm Funkantenne zum Empfang des Korrektursignals; unten rechts: gesamtes Equipment der Referenzstation mit Laptop, GNSS Empfänger und Funkmodem

4.2 Entwicklung des Positionsbestimmungsmoduls

Unter Kapitel 4.1 wurde bereits dargelegt, dass mittels eines phasenbasierten D-GNSS Systems (RTK) eine hochgenaue Positionierung erreicht werden kann. RTK (im Echtzeitbetrieb) offeriert unter ungestörten Umgebungsbedingungen (d.h. ohne Signalabschattung und Mehrwegeeinfluss) eine Genauigkeit besser als 5 cm. Diese Genauigkeit obliegt jedoch keiner Prüfung hinsichtlich der Integrität (Zuverlässigkeit), so dass einerseits durch Interferenzen, Jamming oder kleinräumige Irregularitäten in der Ionosphäre der Signalempfang von GNSS Systemen gestört werden kann und davon auch die Referenzstation betroffen wäre sowie andererseits der Einfluss von Mehrwegeeffekten auf der Kranseite (z.B. durch höher stehende Beleuchtungsanlagen) auch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Insofern ist davon auszugehen, dass eine RTK-Lösung auf Basis des Fixing der Mehrdeutigkeit zwar äußerst *präzise* Ergebnisse liefert, es aber dennoch Fehler (z.B. Offsets) geben kann, die die gestellte Anforderung an ein *hochgenaues* Ergebnis der Positionierung von besser 10 cm (vgl. Kapitel 2.1) in Frage stellen.

In TaT wurde diesem Problem damit begegnet, dass nicht die reine RTK-Lösung vom Ortungssystem an die Kran-SPS übergeben wird, sondern ein Positionsbestimmungsmodul zwischengeschaltet wurde, welche auf Basis der vom Rover-Empfänger gelieferten Position

sowie dem bekannten Fahrweg des Kranes die Zuverlässigkeit der Position bestimmen kann und über Matching Verfahren das Ergebnis exakt auf den Fahrweg überträgt.

4.2.1 Algorithmus

4.2.1.1 Grundannahmen

Der in TaT implementierte Berechnungsalgorithmus geht zunächst von zwei Grundannahmen aus, die mit hoher Wahrscheinlichkeit von nahezu allen im kombinierten Verkehr installierten Krananlagen² erfüllt wird:

1. Die Kranbahn zwischen dem Anfangs- und Endpunkt verläuft nahezu linear, d.h. Krümmungen im Verlauf des Gleises können vernachlässigt werden.
2. Es besteht nur ein unwesentlicher Höhenunterschied zwischen dem Anfangs- und Endpunkt der Kranbahn. Die Kranbahnlängen in Kornwestheim betragen zwischen 350 und 700 m, so dass selbst bei gemessenen Höhenunterschieden zwischen Anfangs- und Endpunkt von ca. 8 m auf der 350 m Bahn sowie von ca. 12 m auf der 700 m Bahn nur eine unwesentliche Zunahme des Fahrweges von max. 10 cm gegenüber einer Bahn auf gleichem Höhenniveau resultiert. Diese Annahmen sind insofern von weiterer Relevanz, da dadurch der mathematische Lösungsalgorithmus für das Matching komplett in die X-Y-Ebene (2D) projiziert werden kann.

4.2.1.2 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten dienen die Messergebnisse des auf dem Kran installierten GNSS-Empfängers (GPS + GLONASS) sowie die Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes des vom Kran befahrbaren Gleisabschnittes. Die Anfangs- und Endpunktkoordinaten des Gleisabschnittes wurden durch hochgenaue statische RTK-Messungen mit einer mm-Genauigkeit durch Postprozessierung ermittelt und stehen als kartesische Koordinatenpaare $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ bzw. $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ in einer Konfigurationsdatei zur Verfügung. Die Ablage in einer Konfigurationsdatei ermöglicht damit auch die Nutzung des Algorithmus für andere Kranbahnen an anderen Standorten. Über die Anfangs- und Endpunktkoordinaten des Gleises lässt sich mittels

$$l_{Kranbahn} = \sqrt{(x_{\max} - x_{\min})^2 + (y_{\max} - y_{\min})^2 + (z_{\max} - z_{\min})^2} \quad (1)$$

bereits vorab die genaue Länge der Kranbahn bestimmen.

Die GNSS Messdaten werden kontinuierlich aus einem NMEA-Datenstrom (GGA-Format) extrahiert, der mit einer Taktrate von 10 Hz geografische Koordinaten (geografische Länge und Breite in Grad, sowie Höhenwert in Meter) im WGS-84 Format liefert. Die Daten werden danach mittels einer Transformation von geografischen (λ, ϕ, h) in kartesische Koordinaten (x, y, z) unter Nutzung folgender Formeln umgewandelt:

$$x_{mess} = (r_N + h) \cdot \cos \phi \cdot \cos \lambda \quad (2)$$

$$y_{mess} = (r_N + h) \cdot \cos \phi \cdot \sin \lambda \quad (3)$$

$$z_{mess} = (r_N \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin \phi \quad (4)$$

² Zumindest jene Krane, die aufgrund von Spurführung einen fest vorgelegten, wiederkehrenden Fahrweg folgen

mit

$$r_N = r_e / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

$$r_e = 6378137 \text{ (Erdradius)}$$

$$e^2 = (2-f)*f$$

$$f = 1/298.257223563 \text{ (Abplattung)}$$

Für die Weiterberechnung in der Ebene sind nur die x- und y-Koordinaten von Interesse. Die z-Koordinate dient lediglich der Plausibilitätsüberprüfung der gewonnenen kartesischen Messwerte.

4.2.1.3 Matching

Aus dem NMEA-Datensatz wird durch die Extraktion des Positionsbestimmungsflags zunächst ermittelt, ob die gewonnene Lösung auf Basis einer

- RTK Fix³ –Lösung (Flag = 4)
- RTK Float⁴ –Lösung (Flag = 5)
- Single Point Lösung (Flag = 1)

beruht. Wird für die Messergebnisse das Flag 4 ausgegeben, so konnte durch den auf dem Kran installierten GNSS-Empfänger über differentielle Messverfahren die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten auf die wahren Werte erfolgen, so dass eine Zentimetergenauigkeit in Echtzeit bei bewegter Nutzerantenne erreicht werden kann. Voraussetzung dafür ist, dass

- Zweifrequenz-Phasenmessungen (L1/L2) erfolgen,
- gute GNSS-Signalempfangsbedingungen von mindestens fünf Satelliten vorliegen,
- und eine geringe Beeinflussung durch ionosphärische Laufzeitverzögerungen erfolgt.

Um das schon relativ hochgenaue Ergebnis weiter zu verbessern, wird im Folgenden ein Matching-Verfahren angewendet, welches die Abweichung von der genau ermittelten Kranbahn bestimmt und den Messwert durch geometrische Verfahren exakt auf die Kranbahn korrigiert.

³ RTK Messung ist initialisiert und die Ambiguitäten (Unbekannten der Trägerphasenmehrdeutigkeiten) sind bestimmt → Positionslösung im Zentimeterbereich

⁴ RTK Messung ist noch nicht initialisiert

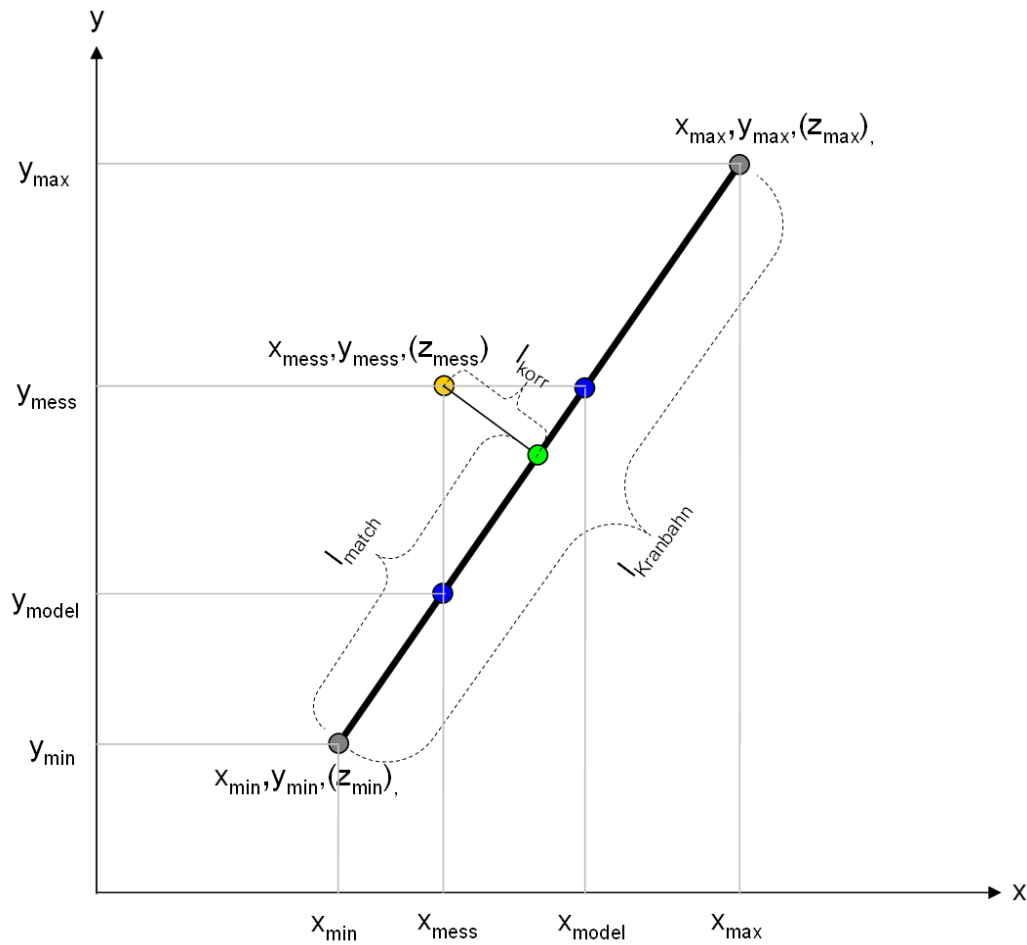


Abbildung 4-6: Matching-Verfahren des RTK Fix Messpunktes (orange) auf den Fahrweg (grün)

Das Verfahren ist exemplarisch für eine spezifische Lage der Kranbahn in der Ebene in Abbildung 4-6 dargestellt. Auf Basis der Eingangswerte lassen sich zunächst die beiden Werte x_{model} und y_{model} bestimmen.

$$x_{model} = \sqrt{\left(\frac{l_{Kranbahn}}{y_{max} - y_{min}} * y_{mess} \right)^2 - y_{mess}^2} \quad (5)$$

$$y_{model} = \sqrt{\left(\frac{l_{Kranbahn}}{x_{max} - x_{min}} * x_{mess} \right)^2 - x_{mess}^2} \quad (6)$$

Diese Werte sind bereits auf die Kranbahn gemappt und grenzen damit den Bereich ein, innerhalb dessen sich der korrigierte Positionswert befindet. Die Länge des daraus resultierenden Distanzstückes kann nur dann als Indikator für die Genauigkeit der Lösung angesehen werden, wenn die Kranbahn im verwendeten X-Y Koordinatensystem sich möglichst optimal im Winkel von 45° einpasst. Verläuft die Kranbahn hingegen in zunehmender Parallelität zur X- oder Y-Achse wird einer der beiden Modellpunkte zwangsweise stark vom gesuchten Mappingwert

abweichen, so dass die Distanz zwischen den beiden Punkten große Werte annehmen kann. Aus diesem Grund wird der Distanzwert im verwendeten Algorithmus nicht als Indikator herangezogen. Denkbar für Folgeentwicklungen wäre jedoch, die Kranbahn durch einen Korrekturwinkel im X-Y-System optimal (d.h. 45° Neigung) anzupassen.

Ziel des Matching-Verfahrens ist es, den kürzesten Weg zwischen Messpunkt und dem Kranfahrweg zu bestimmen, was durch das Fällen des Lotes (90° Winkel) erfolgt. Über die Anwendung des Kathetensatzes im rechtwinkligen Dreieck lässt sich schließlich über den auf den Kranweg gemappten Punkt die Länge des zurückgelegten Fahrweges l_{match} nach folgender Formel bestimmen:

$$l_{\text{match}} = \sqrt{(x_{\text{mess}} - x_{\text{min}})^2 + (y_{\text{model}} - y_{\text{min}})^2} + \frac{(y_{\text{mess}} - y_{\text{model}})^2}{\sqrt{(y_{\text{mess}} - y_{\text{model}})^2 + (x_{\text{model}} - x_{\text{mess}})^2}} \quad (7)$$

Über den Höhensatz lässt sich zudem die Abweichung (l_{korrr}) zwischen dem Messpunkt und dem auf den Fahrweg gemappten Punkt bestimmen:

$$l_{\text{korrr}} = \sqrt{\frac{(y_{\text{mess}} - y_{\text{model}})^2}{\sqrt{(y_{\text{mess}} - y_{\text{model}})^2 + (x_{\text{model}} - x_{\text{mess}})^2}} * \sqrt{(x_{\text{mess}} - x_{\text{min}})^2 + (y_{\text{model}} - y_{\text{min}})^2} - \left(\frac{(y_{\text{mess}} - y_{\text{model}})^2}{\sqrt{(y_{\text{mess}} - y_{\text{model}})^2 + (x_{\text{model}} - x_{\text{mess}})^2}} \right)^2} \quad (8)$$

Die Formeln sind exemplarisch für den Fall dargestellt, dass sich der Messpunkt wie in Abbildung 4-6 dargestellt oberhalb des Fahrweges abbildet.

In der programmtechnischen Umsetzung werden jedoch auch all die Fälle berücksichtigt, in denen die Messpunkte unterhalb der Kranbahn liegen bzw. die Kranbahn selbst andere Neigungswinkel aufweist oder gar in anderen Quadranten liegt (z.B. negativer Anstieg, Vertauschung der min / max-Werte der Kranbahn etc.).

Die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten (Flag = 4) hängt im Wesentlichen davon ab, wie genau die Näherungskoodinatenlösungen sind, wie stark verbleibende systematische Einflüsse wirken und auch die Satellitengeometrie spielt eine Rolle. Gelingt die Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten nicht, wird von einer float-Lösung (Flag = 5) gesprochen, deren Genauigkeit die gestellten Anforderungen von < 10 cm nicht mehr erfüllen kann. Gleiches gilt, wenn der Empfänger in den Mode einer codebasierten Lösung mit Trägerphasenglättung fällt (Flag = 1). In diesen Fällen kommt der Matching-Algorithmus nicht mehr zur Anwendung. Vielmehr wird dann versucht, auf der Grundlage der während des RTK Fix Modes ständig berechneten Werte für die Geschwindigkeit und Beschleunigung eine Fortführung der Messungen auf Basis von Koppelnavigation zu erzielen. Dabei spielt eine entscheidende Rolle, mit welcher Dynamik sich der Kran fortbewegt. Zeigen die Werte für Geschwindigkeit ein nahezu konstantes Verhalten, so lassen sich die Wegpunkte des Kranes noch über einen längeren Zeitraum mit hoher Genauigkeit fortschreiben. Beschleunigt oder bremst der Kran, so lassen sich hingegen nur einige Sample fortschreiben, ohne Gefahr zu laufen, die Genauigkeitsanforderung nicht mehr erfüllen zu können. Der Algorithmus ist so gestaltet, dass das Messsystem versucht, basierend auf Float- bzw. Single-Point-Lösungen auch weiterhin die Geschwindigkeit und Beschleunigung abzuleiten und darauf aufbauend den zurückgelegten Fahrweg zu bestimmen. Gleichzeitig wird jedoch ein Flag erzeugt, welches die verminderte Zuverlässigkeit der Lösung signalisiert. Insofern sollten Float und Single Point basierte Lösungen nicht verwendet werden, wenn sie mit einem Absatzvorgang des Kranes korrelieren.

4.2.2 SW-Umsetzung des PBM

4.2.2.1 Konzeptionelle Entwicklung

Die PBM-Software wurde zunächst unter MATLAB Version R2007b entwickelt. Damit ergaben sich gute Testmöglichkeiten für Einzelanalysen und Grafikausgaben. Unter Bezug auf die in Kapitel 2.4 aufgeführte Anforderung, das PBM ggf. über einen OPC-Server mit der SPS⁵ kommunizieren zu lassen, wurde in einem Testaufbau mit einer vom Projektpartner Polo KnowHow bereitgestellten SPS5 geprüft, ob dieses Konzept (siehe Abbildung 4-7) umsetzbar wäre.

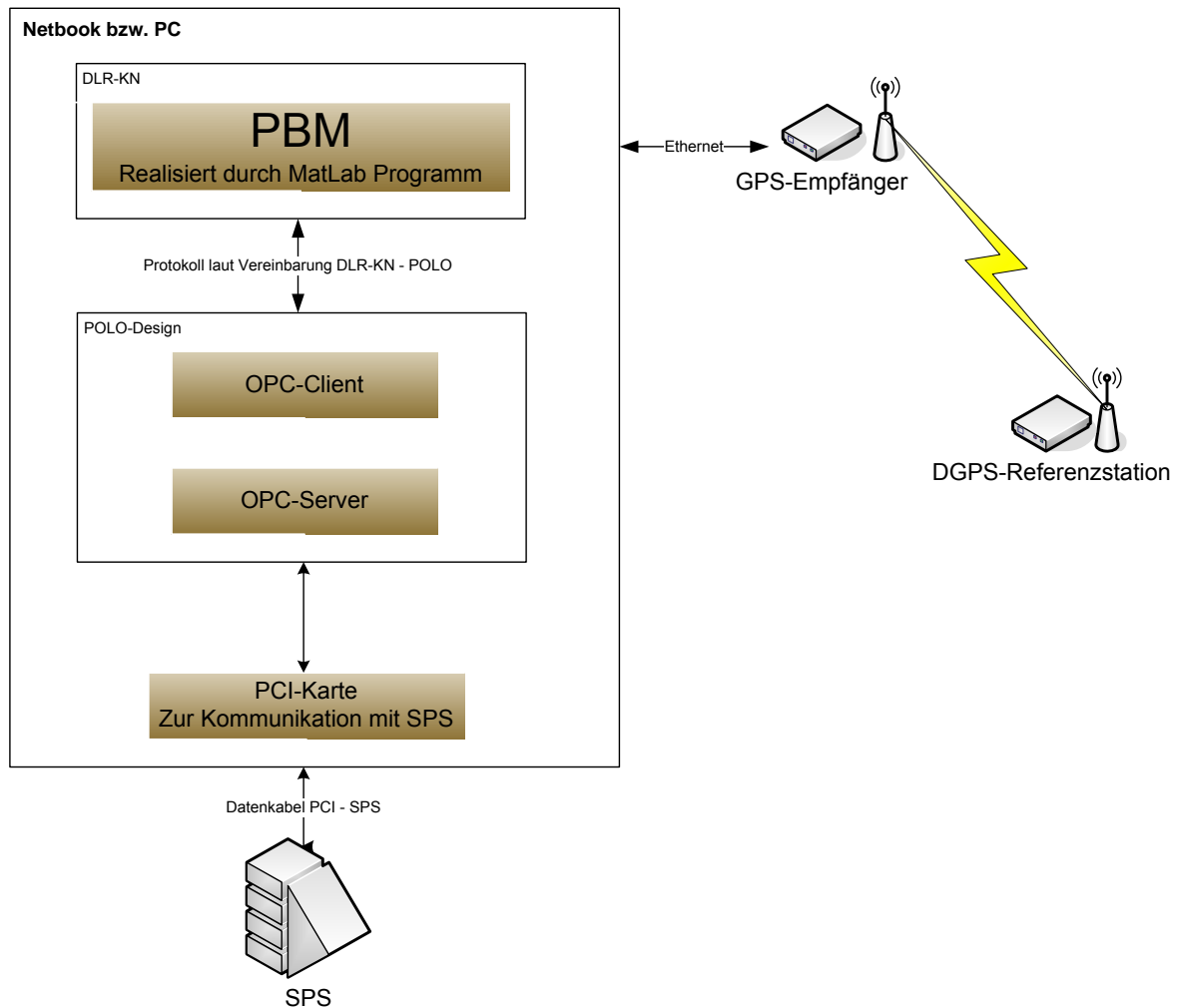


Abbildung 4-7: Verworfenes Konzept der Anbindung des PBM an die SPS über OPC

Die Analysen führten schließlich zu dem Ergebnis, dass sich das Konzept nicht umsetzen lässt, da die Latenzzeiten, die über die Zwischenschaltung des OPC entstehen und pro Schreib- und Lesezyklus bei ca. 500 ms lagen, zu groß sind, um bezüglich der zwischen PBM und SPS bestehenden Datenaustauschrate von 100 ms zu einer synchronisierten Zuordnung der Daten zwischen SPS und PBM zu gelangen.

Daher wurde dieses Konzept verworfen und stattdessen eine Lösung geschaffen, bei der die komplette Strecke des Sendens und Empfanges über OPC entfällt. Dazu wurde die SPS durch

⁵ <http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/de/simatic-s7-controller/Seiten/Default.aspx>

die Firma Kathmann um ein Hardwaremodul (Kommunikationsprozessor CP 343-1 Lean der Siemens AG) erweitert. Über diesen Prozessor ist es der SPS möglich, ihre Daten per Ethernet-Schnittstelle mit dem PBM auszutauschen (siehe Abbildung 4-8).

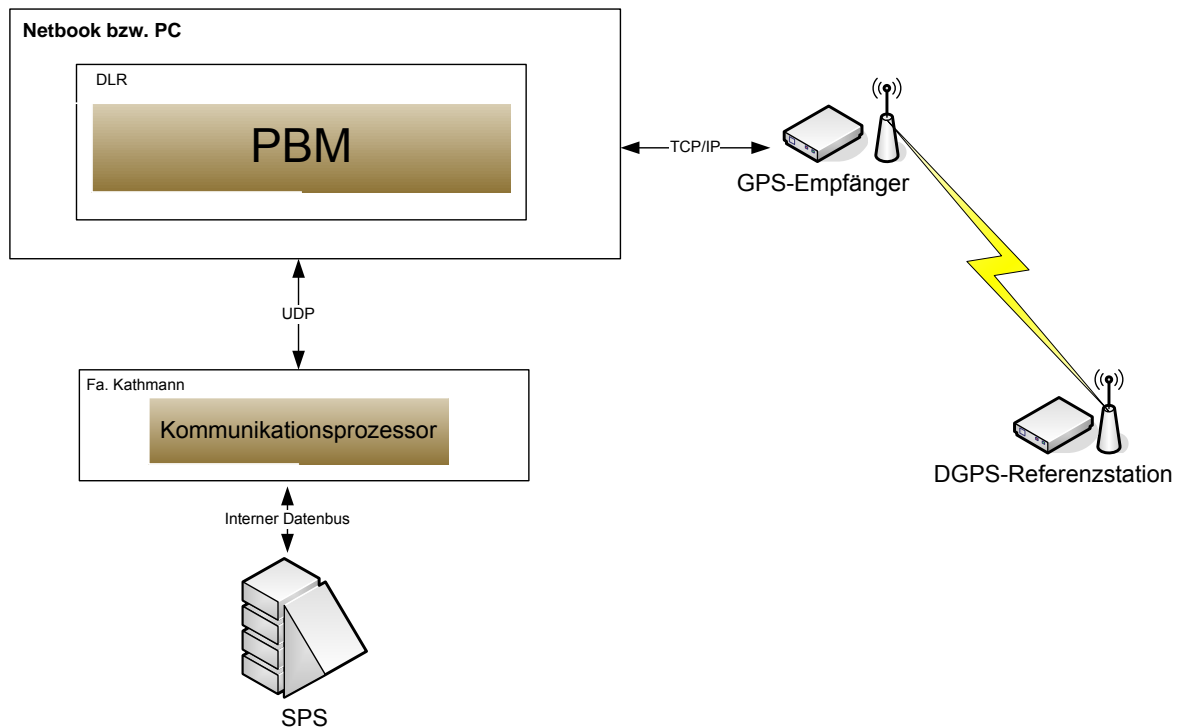


Abbildung 4-8: Umgesetztes Konzept der Anbindung des PBM an die SPS über Kommunikationsprozessor

Für den weiteren Einsatz sowie die Verbindung zur SPS zeigte sich auch, dass ein auf MATLAB-Compiler basierendes selbstausführendes Programm für den permanenten Einsatz ungeeignet erschien. Daher wurde das PBM schließlich unter C++ als eigenständiges Programm entwickelt und bindet sich in das Ortungssystem nach folgendem Blockschaltbild ein (siehe blau hinterlegtes System):

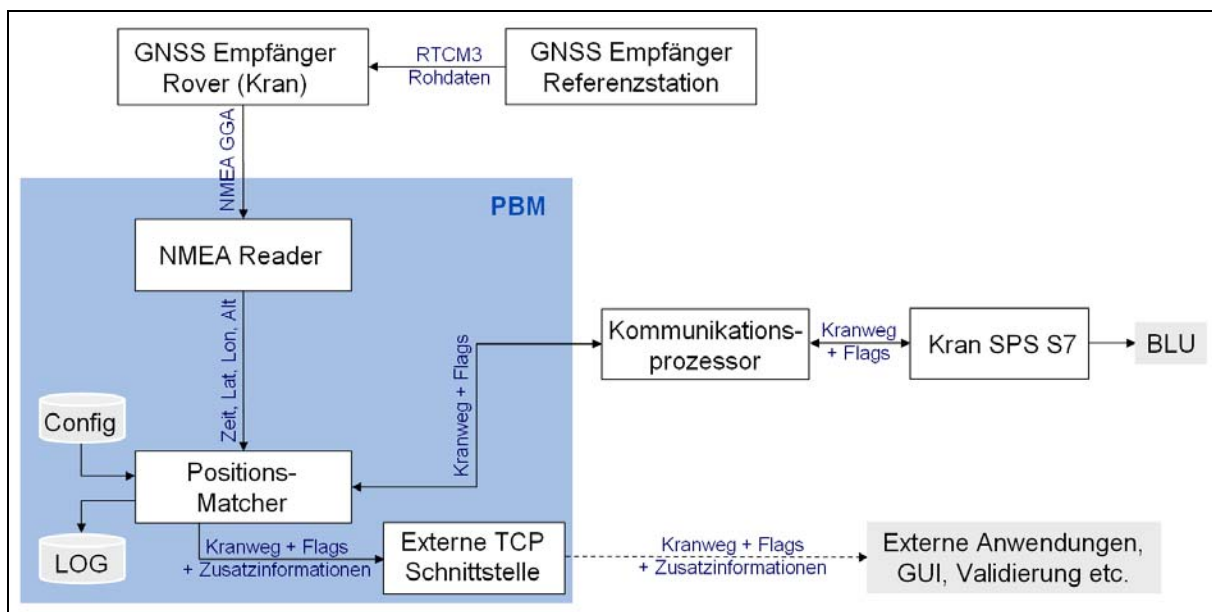


Abbildung 4-9: Blockschaltbild des Ortungssystems (Positionsbestimmungsmodul blauer Kasten)

4.2.2.2 Grafisches Interface

Das PBM kommuniziert über den Kommunikationsserver mit der SPS und tauscht dabei positionsrelevante Daten aus. Um diese Daten für den Nutzer sichtbar zu machen, wurde ein grafisches Nutzerinterface auf der Basis von QT entwickelt (siehe Abbildung 4-10).

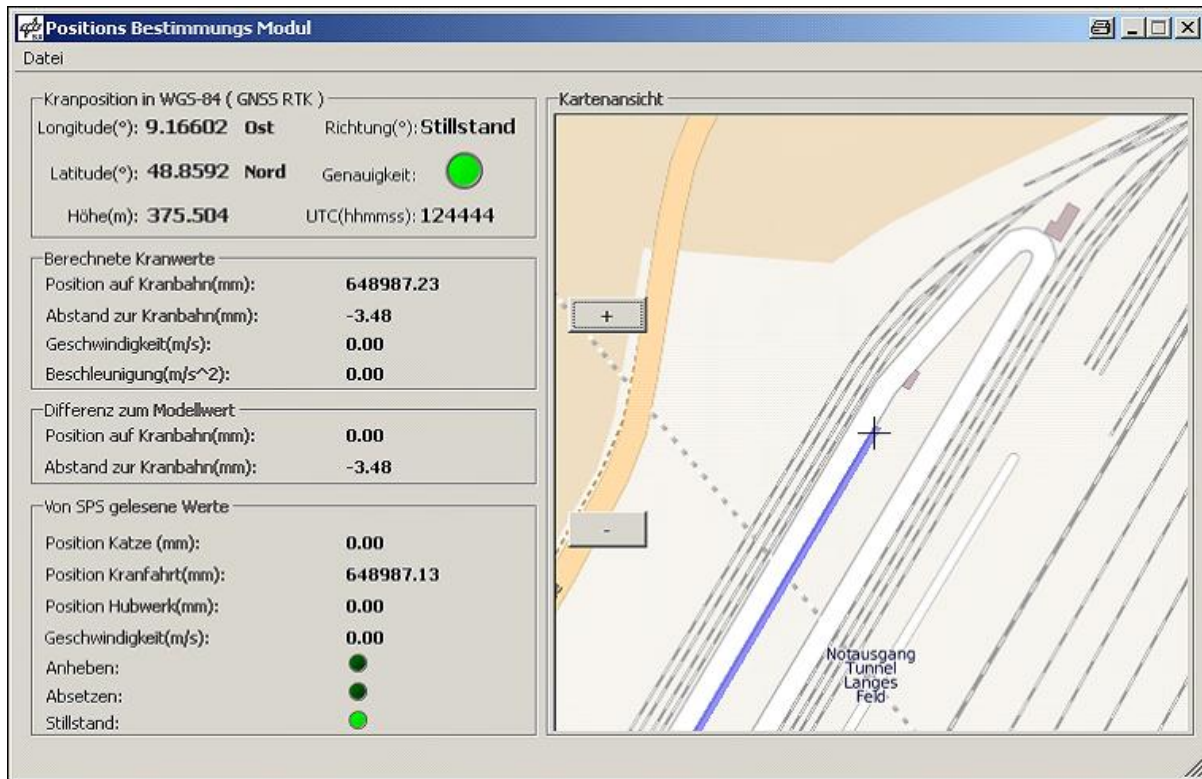


Abbildung 4-10: Grafisches Nutzerinterface für das Positionsbestimmungsmodul

Das grafische Nutzerinterface gibt die mittels RTK gemessene Kranposition in WGS84-Koordinaten aus sowie die auf den exakt auf die Kranbahn gemappten Fahrweg in mm. Zudem wird der Offset angegeben, mit dem der vom PBM aus den WGS84 Koordinaten berechnete Fahrweg vom gemappten Fahrweg abweicht. Ein Genauigkeits-Indikator (LED) gibt an, ob die Werte auf Basis von RTK Fixing berechnet wurden (grün) oder ein Interpolationsalgorithmus greift (gelb), bei dem mit zunehmender Zeit eine stetige Verschlechterung der Position zu erwarten ist. Werden vom Rover-Empfänger keine Daten mehr empfangen, ist die LED auf rot geschaltet. Eine grafische Kartenansicht gibt zudem Auskunft darüber, wo sich der Kran auf der Kranbahn befindet.

4.3 Messergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurden bei diversen Messkampagnen sowohl am DLR Standort Neustrelitz als auch in Kornwestheim umfangreiche Messdaten aufgezeichnet. Die Messungen dienten dazu

- das komplette verwendete Messequipment unter Langzeitbedingungen zu testen
- die Dynamik des Kranes hinsichtlich maximaler Fahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erfassen
- den Messfehler unter Berücksichtigung der bekannten Fahrtrajektorie abzuschätzen
- und die Messergebnisse des satellitengestützten Systems im Vergleich zum vorhandenen Kranwegmesssystem zu analysieren

4.3.1 Messungen unter Langzeitbedingungen

Bei den Messungen unter Langzeitbedingungen hat sich gezeigt, dass die verwendeten geodätischen GNSS-Empfänger einen nahezu wartungsfreien Betrieb gewährleisten können. Dies setzt allerdings voraus, dass im Betriebsregime des Umschlagterminals Sorge dafür zu tragen ist, dass sowohl an der Installation der Referenzstation als auch des Rover keinerlei Veränderungen vorgenommen werden und die gelegentlich erforderlichen Stromabschaltungen am Kran nicht zu einem Ausfall des Messequipments führen (möglichst Pufferung über eine USV). Das derzeit installierte System mit einem zwischengeschalteten Laptop kann zwar Stromausfälle über die Akkulaufzeit überbrücken, müsste aber bei einem längeren Ausfall, der die Akkulaufzeit des Laptop bzw. der USV überschreitet, manuell gestartet werden.

Weiterhin hat sich unter Langzeitbedingungen gezeigt, dass die Empfänger gelegentlich von fixierten RTK-Lösungen auf Single-Point-Lösungen springen. Verbunden damit ändert sich das Genauigkeitspotential der Positionslösung von wenigen Zentimetern auf einige Meter. Dies kann jedoch in Abhängigkeit von der Dynamik des Kranes durch die Algorithmik des PBM entweder über längere Zeiträume überbrückt werden (z.B. bei Stillstand oder konstanter Geschwindigkeit) oder dazu führen, dass der Positionslösung schon nach kurzer Zeit kein Vertrauen mehr geschenkt werden kann (z.B. bei Beschleunigungsvorgängen). Die beobachteten RTK-Ausfälle traten aber fast nahezu immer nur für einzelne Samples auf, so dass mit der wiederkehrenden RTK-Fixlösung und der Überbrückungsalgorithmik ein konstanter Betrieb gewährleistet werden konnte. Längere RTK-Ausfälle konnten nur dann nachgewiesen werden, als Probleme der Korrekturdatenabstrahlung über ein fehlerhaftes Funkmodem seitens der Referenzstation auftraten. Zudem ist nicht ganz auszuschließen, dass auch GNSS-Empfänger bei einem ununterbrochenen Einsatz in ihrer Fehleranfälligkeit zunehmen. Insofern wird für ein späteres industriell einsetzbares System die Notwendigkeit gesehen, dem Empfänger z.B. alle 24 h (jeweils 0.00 Uhr in Zeit des Stillstandes des Kranes) über das PBM einen RESET zu geben.

4.3.2 Messungen zur Krandynamik

Bereits während erster Messungen in 2009 wurde die Dynamik des Kranes untersucht. Dazu wurden aus den in Kornwestheim vom 23.10.2009 bis zum 7.12.2009 ermittelten Positionswerten die maximale Geschwindigkeit v_{\max} und Beschleunigung B_{\max} abgeleitet. Dafür konnten folgende Werte abgeleitet werden, die, versehen mit einer Toleranz, als Grenzwerte für Plausibilitätsuntersuchungen im Rahmen des PBM Algorithmus genutzt werden:

$$V_{\max} = 2,2 \text{ m/s}$$

$$B_{\max} = 0,45 \text{ m/s}^2$$

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt der berechneten Werte für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bremsung (negative Beschleunigung) vom Kran 1.

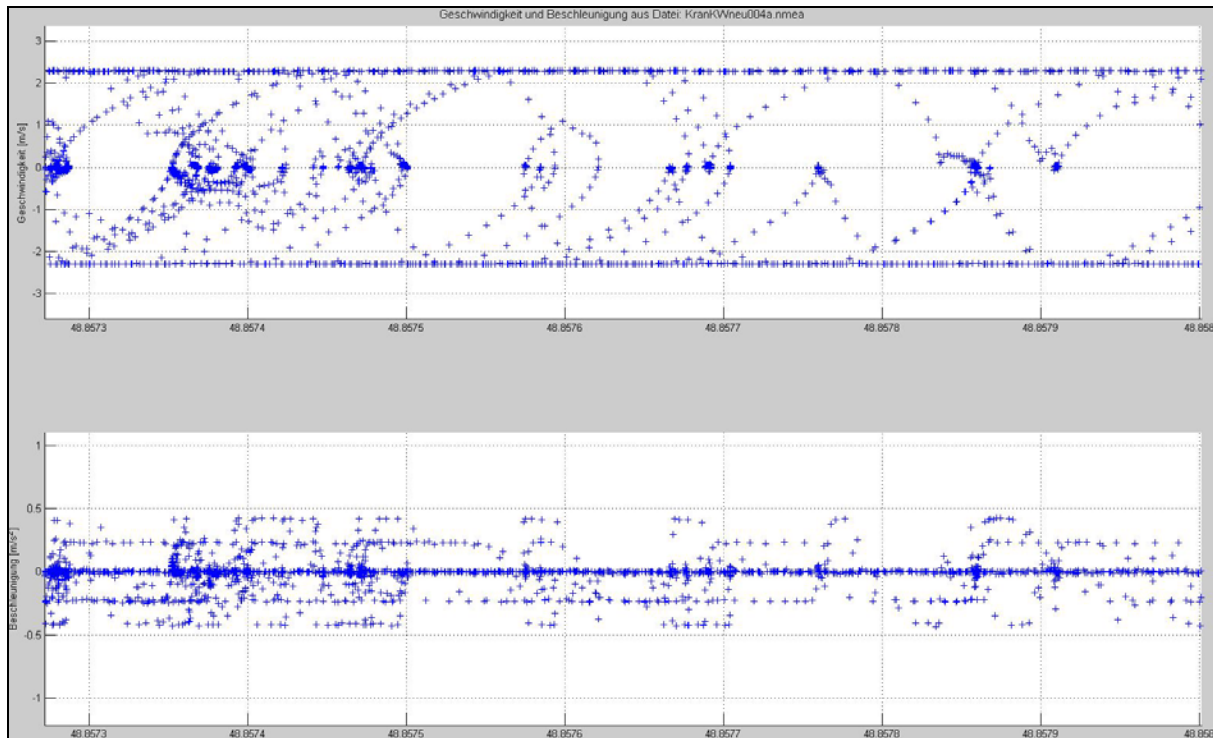


Abbildung 4-11 Ermittlung max. Geschwindigkeits- und Beschleunigungsparameter des Kranes in Kornwestheim auf der Grundlage von RTK basierten GPS Messungen

4.3.3 Bestimmung des Messfehlers

Ein Ziel des Projektes TaT bestand darin, durch den Einsatz satellitenbasierter Ortung Positionsgenauigkeiten entlang des Kranfahrweges besser als 10 cm zu erreichen. Prinzipiell erfüllen die erzielbaren Ortungsgenauigkeiten mit RTK im Bereich von etwa 5 cm dieses Kriterium. Die Validierung der Messergebnisse unterliegt jedoch dem Problem, dass für einen Genauigkeitsnachweis nicht dasselbe Messverfahren verwendet werden sollte, welches für die originäre Messung eingesetzt wurde. Im Rahmen von TaT war es jedoch nicht vorgesehen, alternative Messverfahren (z.B. Laserranging) einzusetzen, um daran eine Ergebnisvalidierung vorzunehmen. Vielmehr sollte bestimmt werden, inwieweit sich die Messergebnisse der neuen RTK basierten Fahrwegmesssystems von den Messergebnissen des bereits im Einsatz befindlichen terrestrisch basierten Messsystems der Firma Elektrotechnik Kathmann (Messung von Raddrehimpulsen und Kalibrierung über Transponder) unterscheiden (siehe Kapitel 4.3.4.). Da zudem der Kranweg durch die genaue Vermessung seines Anfangs- und Endpunktes bekannt ist, war es zudem möglich, die aus dem Matching Algorithmus ableitbare Abweichung zur Kranbahn zu ermitteln und diese als Gütekriterium der RTK-Messung heranzuziehen. Die Abweichung bezieht sich dabei darauf, dass aus dem ermittelten Messpunkt und dem Nullpunkt der Kranbahn eine zurückgelegte Fahrstrecke resultiert und das gleiche auch für den auf die Kranbahn gemappten Punkt gilt. Der Absolutwert der Differenz zwischen den beiden ermittelten Fahrstrecken kann dann als Maß für den Messfehler herangezogen werden. In Abbildung 4-12 ist die Messung dieses Messfehlers basierend auf 1 Hz Daten für einen Kranfahrtzyklus über rund 400 m aufgetragen. Die obere Grafik der Abbildung 4-12 zeigt zunächst das Fahrverhalten des Kranes (Geschwindigkeit) bei Stillstandsphasen, Beschleunigungen bzw. Abbremsungen und das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Die mittlere Grafik zeigt die aus dem PBM ermittelte Messkorrektur, die in Stillstandphasen relativ konstant bei etwa 2,5 cm liegt. In den dynamischen Phasen des Kranes steigt dieser Fehler bis etwa 5 cm, wobei keine direkte Korrelation dazu besteht, ob der Kran gerade einen Beschleunigungsvorgang vollführt oder mit konstanter Geschwindigkeit fährt.

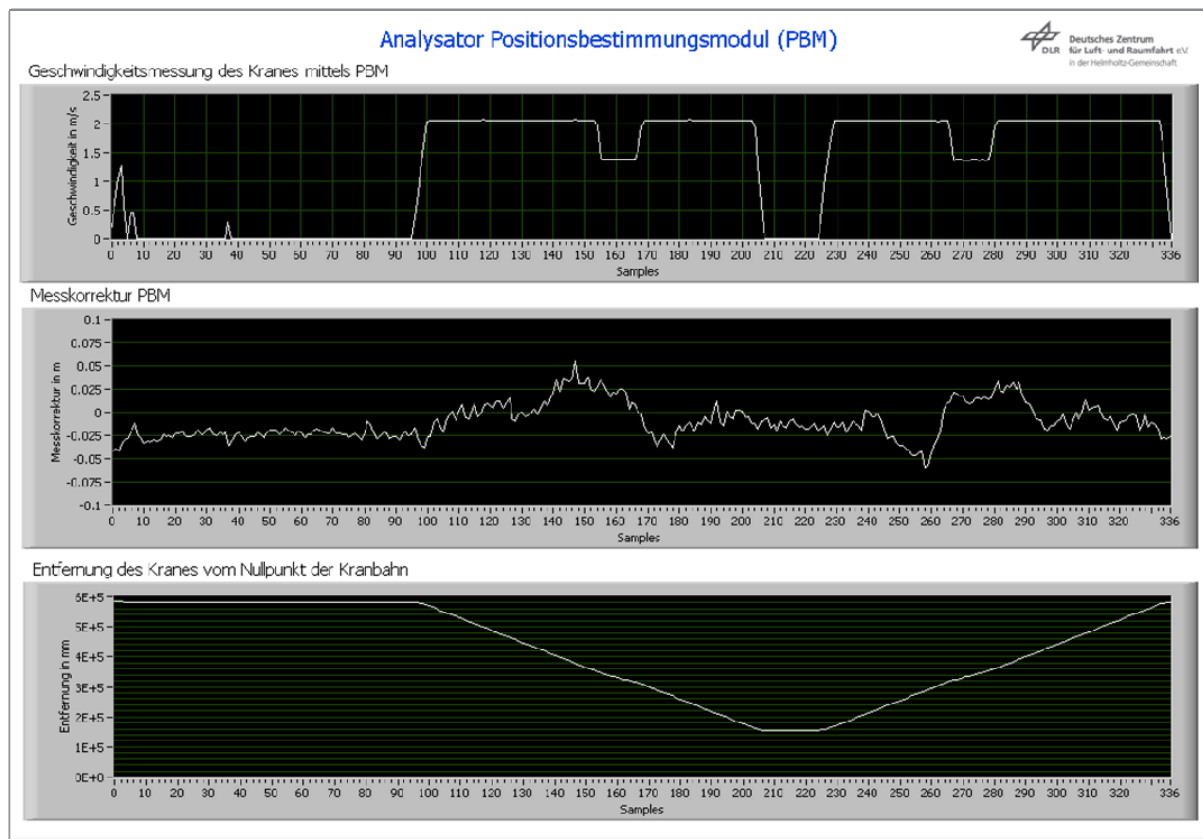


Abbildung 4-12 Anzeige der vom PBM vorgenommenen Messkorrektur für eine Kranfahrtzyklus auf der Grundlage von RTK Fix basierten Positionslösungen (Updaterate 1 Hz)

Die untere Grafik macht noch einmal deutlich, wie weit der Kran bei seiner Bewegung jeweils vom Nullpunkt der Kranbahn entfernt ist. Dies soll dazu dienen, zu sehen, ob auch über die zunehmende Entfernung von der Referenzstation eine mögliche Zunahme des Fehlerbudgets zu erwarten ist. Die Auswertungen zeigten, dass bei einer Positionslösung unter RTK Fix Bedingungen, der Korrekturwert bei max. 5 cm lag und damit die Anforderung an die Genauigkeit als erfüllbar eingestuft werden kann.

4.3.4 Vergleich der Messergebnisse mit vorhandenem Kranwegmesssystem

Das Kranwegmesssystem auf Transponderbasis stand, bedingt durch eine Neuanpassung des Systems während der Projektlaufzeit, erst unmittelbar zu Ende des Projektes für Vergleichsmessungen zur Verfügung. Daher konnten im Rahmen des Projektes nur reine Vergleichsmessungen, jedoch keine weiterführenden Analysen durchgeführt werden. In Abbildung 4-13 ist ein Messzyklus dargestellt, bei dem auf Basis von Daten beider Systeme mit einer Updaterate von 10 Hz die Messdifferenz zwischen beiden Systemen bestimmt wurde. Die obere Grafik zeigt die aus den Messungen des PBM abgeleitete Geschwindigkeit. Das erkennbare Rauschen bei konstanter Geschwindigkeit, welches in Abbildung 4-12 nicht erkennbar war, ist darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeitsmessung hier auf Basis von 10 Hz Daten erfolgte (Abbildung 4-12 nur 1 Hz). Erkennbar sind mehrere Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge, Fahrzyklen mit konstanter Geschwindigkeit sowie eine Reihe von Stillständen, die auf Aufnahme- und Absetzvorgänge von Ladeeinheiten hindeuten.

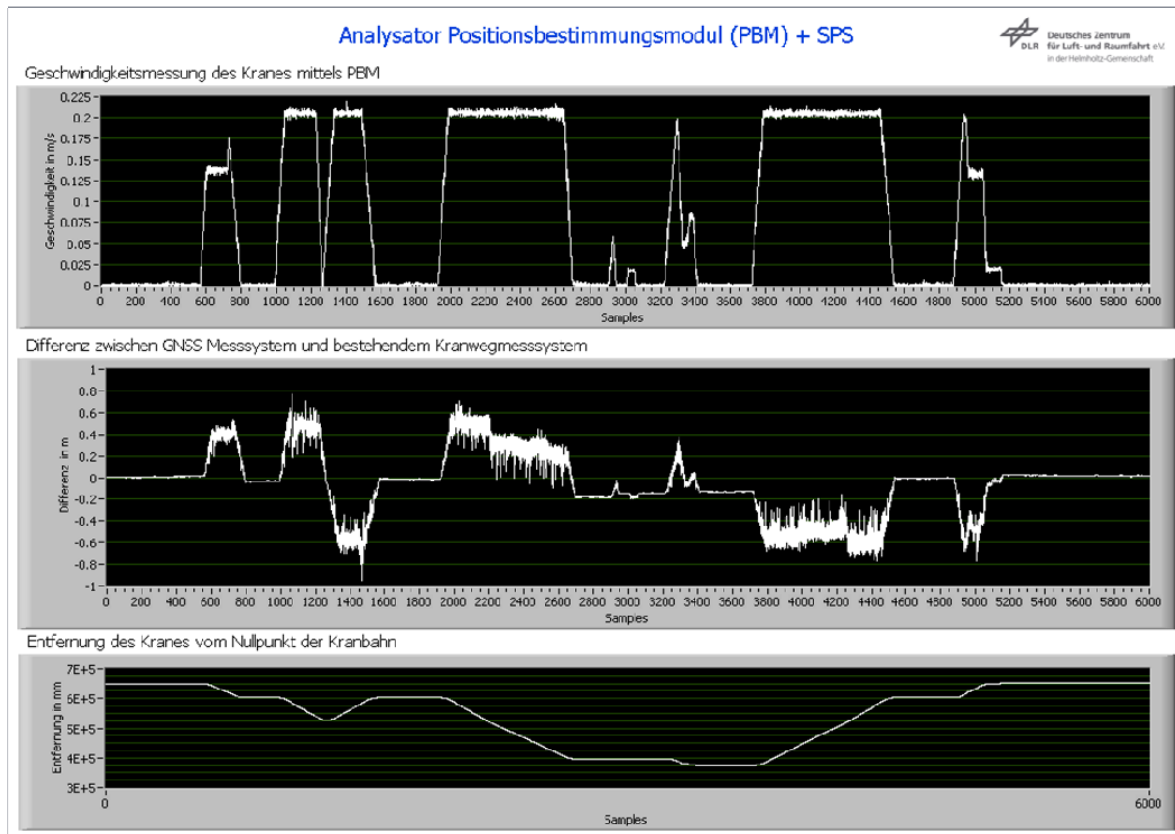


Abbildung 4-13 Vergleich zwischen den Messergebnissen des PBM und der SPS zur Abschätzung der zwischen beiden Systemen bestehenden Messdifferenz

Aus der mittleren Grafik der Abbildung 4-13, die die Differenz zwischen PBM und originärem Kranwegmesssystem darstellt, lassen sich folgende Aussagen ableiten:

In Phasen des Stillstandes des Kranes ist die Differenz zwischen beiden Systemen nahezu konstant und beträgt in den acht erkennbaren Stillstandsphasen 2 cm, 4 cm, 2 cm, 17 cm, 15 cm, 12 cm, 1 cm und 2 cm (exemplarisch ist dazu die erste Stillstandsphase in Abbildung 4-14 dargestellt).

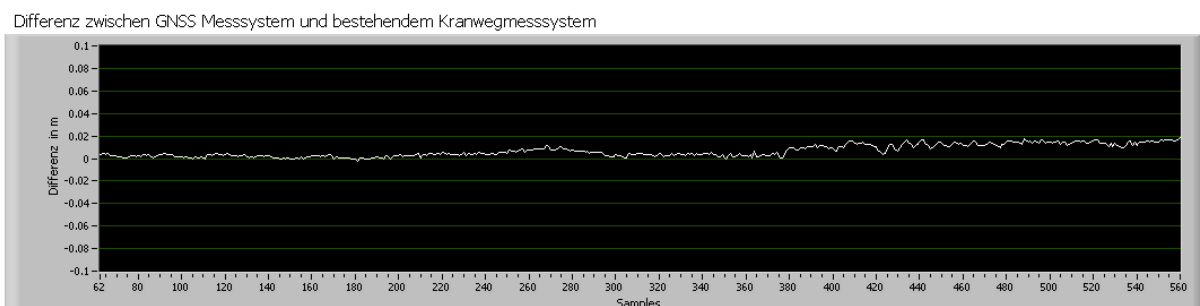


Abbildung 4-14 Differenz der Messergebnisse zwischen PBM und SPS während einer Stillstandsphase des Kranes

Auffällig sind die drei Phasen in der Mitte des Zyklus, bei dem die Differenz im Bereich von 15 cm liegt. Da die Differenz über den Stillstandzyklus als konstant ausfällt, kann davon ausgegangen werden, dass dies den Fehler des bestehenden Messsystems repräsentiert, der durch das Driftverhalten zwischen den Kalibrierungspunkten entsteht. Aus der Kenntnis der

Lage der Kalibrierungspunkte, die den Autoren leider nicht vorliegen, ließe sich dies weiter validieren.

In Phasen der Beschleunigung nimmt die Differenz zwischen dem PBM und dem bestehenden Kranwegmesssystem stetig zu (bzw. nimmt es stetig ab, wenn es sich um Bremsvorgänge handelt). Während konstanter Fahrtzyklen (in Abbildung 4-13 sind davon fünf erkennbar) liegen die mittleren Abweichungen zwischen 30 und 50 cm. Dabei ist allerdings erkenntlich, dass ein konstanter Offset besteht und die Schwankungsbreite der Messergebnisse bei rund 20 cm liegt. Diese Werte lassen die Schlussfolgerung zu, dass die zeitliche Korrelation zwischen den vom PBM und der SPS ermittelten Werten nicht stimmig ist. Anders ausgedrückt heißt das, dass bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von rund 2,2 m/s nur alle 22 cm ein Messwert aufgezeichnet wird. Liegen die Zeitpunkte in denen das PBM sowie die SPS ihre Ergebnisse messen nur 100 ms auseinander, wird schon ein Offset von 22 cm erzeugt (bis 200 ms sind es bereits 44 cm). Dies erklärt auch, warum bei zunehmender bzw. abnehmender Geschwindigkeit sich der Offset verändert und im Stillstand nahezu 0 ist (da es dort keine Rolle spielt, wenn die Messzeitpunkte nicht exakt übereinstimmen). Aus den Ergebnissen lässt sich daher ableiten, dass für den Vergleich beider Systeme seitens der SPS ein genaues Zeitsignal anliegen muss, um eine Synchronisation beider Signale zu ermöglichen. Einflüsse aufgrund von Latenzen bei der Übertragung des Signals vom PBM zum Kommunikationsserver bzw. zwischen SPS und Kommunikationsserver wären ebenfalls als Möglichkeit zur Erklärung des Sachverhaltes in Betracht zu ziehen.

5 Verwertung

5.1 Unmittelbare Weiterverwendung der Projektergebnisse

Die Ergebnisse und Daten aus dem Teilvorhaben „Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und mobilen Einheiten“ des Verbundvorhabens TaT werden direkt in weiteren Projekten mit DLR-Beteiligung verwendet. Darüber hinaus sind die gewonnenen Erkenntnisse aus der Langzeiterprobung des Demonstrators zwingend erforderlich für eine Fortsetzung des Projekts, insbesondere hinsichtlich einer Erweiterung des Demonstrators zu einem Prototyp mit dem Ziel der wirtschaftlichen Realisierung.

5.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das vom DLR entwickelte und als Demonstrator erprobte Kranwegemesssystem auf Basis von Satellitennavigation hat die physische Machbarkeit unter Beweis gestellt. Dies konnte auch im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik gezeigt werden, welches ein Kranwegemesssystem auf Transponder-Basis ist. Die Wirtschaftlichkeit des innovativen Systems ist einzig noch zu untersuchen. Dies sollte im Rahmen eines weiteren Projekts geschehen, in dem das System zu einem Prototyp weiterentwickelt wird. Die Ergebnisse des Folgeprojekts können dann für eine industrielle Vermarktung und den weiteren Forschungsansatz dienen.

Erste Abschätzungen der Wirtschaftlichkeit auf Grundlage der beschafften Hardware und einer Abschätzung der Wartbarkeit des Systems während der Langzeitmessungen lassen auf eine positive Wirtschaftlichkeit des Systems schließen.

5.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Nach Abschluss des Projektes BLU war eine funktionsfähige Lösung für das reine Container-Management vorhanden und erprobt. Im Anschluss an das Projekt wurde diese Lösung als Standard-System in allen Containerumschlagbahnhöfen der DUSS eingeführt. Im Rahmen des Projektes TaT wurde die Genauigkeit der Positionierung in Längsbahnrichtung sowie die Integration der kraneigenen Positionsbestimmung in das System BLU realisiert. Auch hierbei ist von einer flächendeckenden Einführung auszugehen.

In einem nachfolgenden Schritt wäre eine Integration in die betriebliche Disposition vor allem der schienengebundenen Verkehre erforderlich. In diesem Fall würde eine durchgängige Kette der Erfassung und Verfolgung erreicht werden: Der Container wird als Ladegut eines Zuges aus der eisenbahnbetrieblichen Disposition vorgemeldet, wird am Eingang des Umschlagbahnhofes erfasst und mit seiner Position im Zug gespeichert. Im Folgenden Schritt kann der Umschlag unmittelbar erfolgen. In der umgekehrten Richtung wird der Container auf dem LKW erfasst und bis zur Frachtverfolgung weitergegeben.

Aus wissenschaftlicher Sicht konnte gezeigt werden, dass zum einen auch unter der sehr anspruchsvollen Umgebung eines Umschlagbahnhofes der Einsatz von GNSS möglich ist und zum anderen die Ergebnisdaten hinreichend genau sind. Die Umgebung ist für GNSS und differentielle Verfahren wie GBAS sehr anspruchsvoll, weil die große Zahl an metallischen Flächen viele kurzfristige oder auch längerfristige Abschattungen erzeugt. Darüber hinaus sind viele elektrische Komponenten an den Containern, den Kranen und in der weiteren Umgebung aktiv, was zu einer großen Zahl von Störfeldern führt. Auch die lange schmale Proportion von Umschlagbahnhöfen, macht die Anordnung solcher Systeme anspruchsvoll.

Nach der Lösung der technischen Aufgabenstellung ist die nun konsequenterweise folgende Aufgabe die der betrieblichen Integration. Hier findet sich eine gute Überdeckung mit der wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit.

Ohne den wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Abschluss bleiben die erheblichen Potenziale von BLU und TaT teilweise ungenutzt.

5.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die in der Projektbeschreibung aufgezeigten Aufgabenstellungen konnten im Rahmen der Projektlaufzeit zu einem positiven Abschluss geführt werden.

Einzig die Entwicklung eines Positionssystems für mobile Kraneinheiten, die derzeit nur noch vereinzelt in Containerterminals der DUSS Verwendung finden, wurde in gegenseitiger Abstimmung zwischen Projektträger und Projektpartnern nicht durchgeführt. Die mobilen Einheiten werden auf Grund der unverhältnismäßigen Belastung der Fahrbahn nicht mehr eingesetzt.

5.5 Veröffentlichung / Demonstration der Ergebnisse

Die Entwicklung und Erprobung des Systems wurde neben den Labortests am DLR-Standort Neustrelitz auch im Betrieb des Umschlagbahnhofes der DUSS in Kornwestheim durchgeführt. Am 13. Mai 2011 wurde im Rahmen des Abschlusses des Verbundvorhabens TaT in Kornwestheim die physische Machbarkeit Teilnehmern aus Industrie, Forschung und Politik anhand des Betriebsablaufs vor Ort und in Form von Vorträgen präsentiert.

6 Zusammenfassung

Aufgrund des stetig steigenden Aufkommens im Güterverkehr – insbesondere im kombinierten Verkehr – und der politischen Zielrichtung den Modal Split zugunsten des Schienenverkehrs zu beeinflussen, bedarf es neben einer Erweiterung von Eisenbahninfrastrukturen einer Optimierung der vorhandenen Infrastrukturen zur Kapazitätserhöhung. Besonderer Fokus liegt im kombinierten Verkehr insbesondere auf den Umschlagbahnhöfen Schiene – Straße (Terminals des kombinierten Verkehrs).

Diese Motivation aufgreifend wurde das Forschungsvorhaben und Verbundprojekt „Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr“ (TaT) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Im Teilvorhaben „Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und mobilen Einheiten“ hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik und Institut für Kommunikation und Navigation, ein auf Basis von Satellitennavigation basierendes Ortungssystem für Kräne entwickelt. Für eine Teilautomatisierung des Terminalbetriebs ist die hochgenaue Positionsbestimmung der Kräne unerlässlich, deren Positionsbestimmung der Längsfahrt aufgrund von Schlupfverhalten der Stahlräder auf den Schienen problematisch ist.

Hierzu hat das DLR ein Ortungssystem im Labor am Standort Neustrelitz und im Umschlagbahnhof der DUSS mbH in Kornwestheim entwickelt und erprobt, welches auf Basis von phasenbasierten Differential-GNSS (RTK - Real Time Kinematic) eine hochgenaue Ortung mit einer Genauigkeit < 10 cm ermöglicht. Hierzu wurde eine Algorithmik entwickelt, die für das Umfeld Portalkrane in Umschlagbahnhöfen geeignet ist.

Des Weiteren wurde eine anforderungsgerechte Schnittstelle zwischen dem Ortungssystem und dem Kran spezifiziert und umgesetzt, damit die Ortungsinformation vom Kran und daran angeschlossenen weiteren Systemen zur Optimierung der Terminalkapazitäten in Echtzeit genutzt werden kann.

Die physische Machbarkeit des Ortungssystems wurde anhand des Demonstrators im Umschlagbahnhof Kornwestheim am 13. Mai 2011 Teilnehmern aus Wirtschaft, Forschung und Politik präsentiert.

7 Anhang

7.1 Referenzen

- [1] Technical Note: TaT Anforderungen des DLR an Daten aus Kransteuerung für Positionsangaben, 11.5.2009
- [2] Technical Note: TaT HW Aufbau des RTK Messsystems zur Positionsbestimmung von Kranen am DUSS Standort Kornwestheim, 25.1.2010
- [3] Technical Note: TaT Systemkonzept für Die Hochgenaue Positionsbestimmung des Fahrweges des Kranes, 29.1.2010
- [4] Technical Note: TaT Protokollspezifikation für die Kommunikation zwischen Positionsbestimmungsmodul und OPC Client, 21.7.2010
- [5] Technical Note: TaT Konzept Kommunikation PBM und Kommunikationsprozessor -> SPS, 18.2.2011
- [6] Technical Note: TaT Positionsbestimmungsmodul, 08.4.2011
- [7] Ergebnisbericht (Kurzfassung), TAT: Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr Teilvorhaben: Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und mobilen Einheiten, 26.04.2011

7.2 Abkürzungsverzeichnis

2D	Zwei-Dimensional
BLU	Betriebs-Leitsystem-Unschlagbahnhof der Fa. Berghoff
CMR	Compact Measurement Record
Config	Configuration
D-GNSS	Differentielles GNSS
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DUSS	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH
E/A	Eingabe/Ausgabe
ERP	Effective radiated power
Galileo	Europäisches Satellitennavigationssystem
GBAS	Ground Based Aumentation Systems
GGA	Global Positioning System Fix Data – Datenformat des WGS84-Systems
GLONASS	ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА (russ. f. Globales Satellitennavigationssystem)
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HW	Hardware
Hz	Hertz

KHz	Kilohertz
KN	Institut für Kommunikation und Navigation, DLR e. V.
LAN	Local Area Network
LE	Ladeeinheiten
LED	Licht Emittierende Diode
LOG	Logging of data
MHz	Megahertz
ms	Millisekunde
NMEA	National Marine Electronics Association
ntrip	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OLE	Object Linking and Embedding
OPC	OLE for Process Control
PBM	Positions-Bestimmungs-Modul
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
QT	C++-Klassenbibliothek für die plattformübergreifende Programmierung grafischer Benutzeroberflächen
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematik
SIS	Service Information System – Software System der Polo Know-How GmbH
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung (Siemens System)
SW	Software
TaT	neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr (BMW gefördertes Forschungsvorhaben)
TCP	Transmission Control Protocol
TS	Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR e. V.
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
W	Watt
WGS84	World Geodatic System 1984 (geodätisches Referentsystem)

7.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Interfaces zwischen verschiedenen Elementen der Kransteuerung unter Einbeziehung des Positionsbestimmungsmoduls	6
Abbildung 3-1: Verwendetes Koordinatensystem zur Beschreibung der Position eines Containers während der Kranfahrt	7
Abbildung 4-1: Lage der Kranbahnen im Containerterminal Kornwestheim, Quelle: Bing Maps + eigene Beschriftung	9
Abbildung 4-2: Darstellung der Lage der beiden Hauptkomponenten des Ortungssystems; feste Referenzstation im Eingangsbereich des Terminals und bewegliches Ortungssystem auf Kranbahn 2 (Kran 3,) Quelle: Bing Maps + eigene Beschriftung.....	10
Abbildung 4-3: Schematische Zeichnung des Aufbaus und der Komponenten des D-GNSS basierten Ortungssystems am DUSS Standort Kornwestheim.....	11
Abbildung 4-4: Installierte Komponenten am Standort der Referenzstation; oben links: Eingangsgebäude der DUSS mit Antenne an rechter Vorderseite; oben rechts: GNSS-Empfänger und Funkmodem, unten links: GNSS Antenne und 70 cm Funkantenne zur Abstrahlung des Korrektursignals; unten rechts: gesamtes Equipment der Referenzstation mit PC, GNSS-Empfänger, Funkmodem und Monitor.	12
Abbildung 4-5: Installierte Komponenten auf dem Kran; oben links: Krananlage; oben rechts: GNSS-Antenne, unten links: 70 cm Funkantenne zum Empfang des Korrektursignals; unten rechts: gesamtes Equipment der Referenzstation mit Laptop, GNSS Empfänger und Funkmodem.....	13
Abbildung 4-6: Matching-Verfahren des RTK Fix Messpunktes (orange) auf den Fahrweg (grün)	16
Abbildung 4-7: Verworfenes Konzept der Anbindung des PBM an die SPS über OPC	18
Abbildung 4-8: Umgesetztes Konzept der Anbindung des PBM an die SPS über Kommunikationsprozessor	19
Abbildung 4-9: Blockschaltbild des Ortungssystems (Positionsbestimmungsmodul blauer Kasten).....	19
Abbildung 4-10: Grafisches Nutzerinterface für das Positionsbestimmungsmodul.....	20
Abbildung 4-11 Ermittlung max. Geschwindigkeits- und Beschleunigungsparameter des Kranes in Kornwestheim auf der Grundlage von RTK basierten GPS Messungen	22
Abbildung 4-12 Anzeige der vom PBM vorgenommenen Messkorrektur für eine Kranfahrtzyklus auf der Grundlage von RTK Fix basierten Positionslösungen (Updaterate 1 Hz)	23
Abbildung 4-13 Vergleich zwischen den Messergebnissen des PBM und der SPS zur Abschätzung der zwischen beiden Systemen bestehenden Messdifferenz	24
Abbildung 4-14 Differenz der Messergebnisse zwischen PBM und SPS während einer Stillstandsphase des Kranes.....	24

7.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Beschreibung der Inputdaten der SPS an das PBM.....	8
Tabelle 3-2: Beschreibung der Outputdaten des PBM an die SPS	8